

Lenka LAUSOVÁ¹

MEZNÍ ÚNOSNOST OCELOVÉHO NOSNÍKU ZA POŽÁRU

LOAD BEARING CAPACITY OF STEEL BEAM DURING FIRE

Abstrakt

Príspevek se zabývá vyhodnocením času dosažení mezní momentové únosnosti staticky neurčitého ocelového nosníku v průběhu požáru. Výsledkem je srovnání výpočetního postupu pro pružný stav se stavem, kdy je počítáno se schopností plastizace materiálu. Řešený nosník je počítán ve dvou variantách a to protipožárně nechráněný a chráněný obkladem ze sádrovláknitých desek. Ve výpočtu je zahrnut vliv nerovnoměrného rozdělení teploty po délce nosníku.

Klíčová slova

Mezní únosnost, plasticita, požár, nosník, plastický kloub.

Abstract

In the paper there is described a determination of minimum flexural capacity of a beam from ductile material under fire load. There is compared the beam without any protection against fire and protected beam in elastic state and in the plastic state. The result is a comparison of time of reaching flexural capacity for all examples.

Keywords

Load bearing capacity, plasticity, fire, beam, plastic hinge.

1 ÚVOD

U ocelových konstrukcí je možno využít schopnosti materiálu plastizovat. Díky momentové redistribuci lze získat alternativní způsob přenosu zatížení až do vyčerpání mezní plastické únosnosti. Jsou-li ocelové konstrukce vystaveny účinkům požáru, dochází k poklesu pevnosti materiálu.

V práci je řešen nosník (I profil) nechráněný a chráněný obkladem ze sádrovláknitých desek. Výsledkem je srovnání časů mezní únosnosti za požáru pro pružný stav a pro nosník po plastizaci. V příspěvku je zahrnut vliv nerovnoměrného rozdělení teploty po délce nosníku. Vliv posouvajících sil na velikost mezního momentu není podstatný a je ve výpočtu zanedbán.

2 MEZNÍ PLASTICKÁ ÚNOSNOST PRUTOVÝCH KONSTRUKCÍ

Plastický kloub vznikne v místě maximálního ohybového momentu na nosníku při rostoucím zatížení nebo klesající pevnosti materiálu.

Výpočet mezní plastické únosnosti podle [1] a [2] je možný třemi postupy: metodou kinematickou, statickou nebo tzv. postupným řešením. U konstrukcí, které jsou vystaveny účinkům požáru, nepůjde o zjištění mezního zatížení, ale při konstantním zatížení a klesající pevnosti materiálu z důvodu rostoucí teploty je zjišťován čas dosažení mezní plastické únosnosti za požáru.

¹ Ing. Lenka Lausová, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 326, e-mail: lenka.lausova@vsb.cz.

2.1 Výpočet momentové únosnosti za požáru

Momentová únosnost za požáru $M_{fi,\theta,Rd}$ [kNm] pro průřezy třídy 1 a 2 při rovnoměrném rozdělení teploty θ_a po průřezu se vypočte z plastické momentové únosnosti za pokojové teploty $M_{pl,Rd}$ tak, že se redukuje mez kluzu součinitelem $k_{y,\theta}$ a součinitel spolehlivosti za pokojové teploty se přepočítá na spolehlivost za požární situace podle [3]:

$$M_{fi,\theta,Rd} = W_y \cdot k_{y,\theta} \cdot f_{y,k} \cdot \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \quad (1)$$

kde:

W_y – modul průřezu [m³];

$k_{y,\theta}$ – redukční součinitel meze kluzu [-];

$\gamma_{M,0}$ – součinitel spolehlivosti za běžné teploty (=1) ;

$\gamma_{M,fi}$ – součinitel spolehlivosti za požáru (=1) ;

$f_{y,k}$ – charakteristická mez kluzu [MPa].

Další upřesnění momentové únosnosti v závislosti na rovnoměrnosti rozdělení teploty po výšce průřezu nebo délce nosníku se vypočte pomocí redukčních součinitelů κ_1 a κ_2 :

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2} \quad (2)$$

kde:

κ_1, κ_2 – jsou součinitelé nerovnoměrného rozdělení teploty po výšce průřezu a délce nosníku [-].

Pro průřez exponovaný ze čtyř stran je hodnota $\kappa_1 = 1,00$, pro podpory staticky neurčitého nosníku lze uvažovat $\kappa_2 = 0,85$, pro ostatní případy $\kappa_2 = 1,00$.

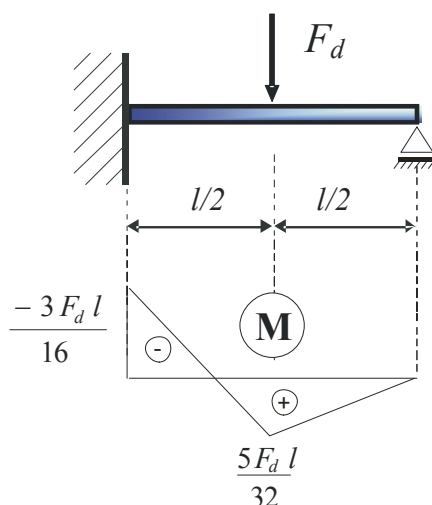
2.2 Pružný stav

Řešený nosník je z jedné strany vetknutý, z druhé strany kloubově podepřený a uprostřed zatížen silou F_d (viz obr. 1). Ohybový moment za požáru je podle [4] a [5]:

$$M_{fi,Ed} = \eta_{fi} M_{Ed} \quad (3)$$

kde:

η_{fi} – je redukční součinitel pro požární návrhovou situaci [-].



Obr. 1: Pružný stav

Maximální moment ve vetknutí lze vyjádřit $M_{fi,Ed} = \eta_{fi} \cdot (-3F_d \cdot l/16)$, kde η_{fi} je možno konzervativně uvažovat pro ocelové konstrukce hodnotou 0,65.

Redukční součinitel meze kluzu za požáru $k_{y,\theta}$ [-] na mezi únosnosti se vypočte podle (2) a (3):

$$\frac{W_y k_{y,\theta} f_{y,d}}{\kappa_1 \kappa_2} = \frac{3}{16} F_d l \eta_{fi} \Rightarrow k_{y,\theta} = \frac{3 F_d l \kappa_1 \kappa_2 \eta_{fi}}{16 W_y f_{y,d}} \quad (4)$$

2.3 Plastický stav

V práci bude použita kinematická metoda a jednoduché rovnice pro rovnost práce vnějších a vnitřních sil. V plastickém deformovaném stavu je nosník považován za dvě tuhé desky s rotací φ , které způsobí průhyb uprostřed rozpětí $\delta = \varphi \cdot l/2$ (viz obr. 2). Do konstrukce vložíme dva plastické klouby tak, že vznikne mechanismus o jednom stupni volnosti. Z podmínky rovnosti práce vnějších a vnitřních sil (vnější práce daná svislým posunem působícího zatížení je rovna vnitřní práci, která je dána plastickou rotací v plastických kloubech) platí:

$$\sum F_i \delta_i = \sum M_{mez,j} \varphi_j \quad (5)$$

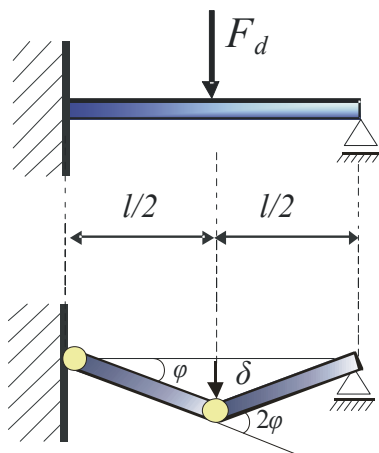
kde:

F_i – vnější síly,

δ_i – posuvy působišť těchto sil,

$M_{mez,j}$ – mezní plastické momenty v místě plastických kloubů,

φ_j – vzájemná pootočení částí přilehlých k plastickému kloubu.



Obr. 2: Nosníkový mechanismus

Po dosazení do (5) získáme rovnici:

$$F \cdot \delta = 2\varphi \cdot M_{mez,fi}^+ + \varphi \cdot M_{mez,fi}^- \quad (6)$$

Pro kladný moment v poli podle (1) a (2) platí hodnota součinitelů $\kappa_l=1$ a $\kappa_2=1$:

$$M_{mez,fi}^+ = \frac{W_{y,plast} k_{y,\theta} f_y}{\kappa_1 \kappa_2 \eta_{fi}} \quad (7)$$

Pro záporný moment ve vetknutí platí hodnota součinitelů $\kappa_l=1$ a $\kappa_2=0,85$:

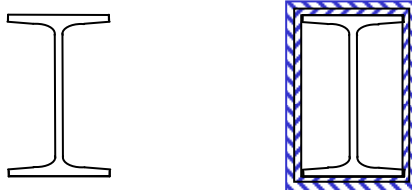
$$M_{mez,fi}^- = \frac{W_{y,plast} k_{y,\theta} f_y}{\kappa_1 \kappa_2 \eta_{fi}} \quad (8)$$

Dosazením do rovnice (6) vztahy (7) a (8) a za $\delta = \varphi \cdot l/2$ získáme vztah pro výpočet redukčního součinitele meze kluzu $k_{y,\theta}$ pro plastický stav:

$$k_{y,\theta} = \frac{0,85 F_d l \eta_{fi}}{5,4 W_{y,plast} f_y} \quad (9)$$

3 ŘEŠENÝ NOSNÍK

Průřez posuzovaného nosníku je z válcovaného I profilu, délka nosníku $l = 4\text{m}$, návrhová síla $F_d = 60\text{kN}$ a pro tento nosník bude vyjádřena mezní plastická únosnost pro průřez nechráněný a chráněný sádrovláknitou deskou.



a) nechráněný průřez

b) protipožárně chráněný průřez

Obr. 3: Průřezy řešených nosníků

3.1 Nechráněný průřez

Nosník je navržen z profilu I200, materiál S235, povrch průřezu $A_m = 0,71\text{m}^2\text{m}^{-1}$, plocha průřezu $A = 3,34 \cdot 10^{-3}\text{m}^2$, $W_y = 214 \cdot 10^{-6}\text{m}^3$, $W_{y,plast} = 248 \cdot 10^{-6}\text{m}^3$.

Nechráněný průřez I200 má součinitel průřezu za požáru:

$$\left[\frac{A_m}{V}\right]_b = \frac{2 \cdot 0,090 + 2 \cdot 0,200}{3,34 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,58}{3,34 \cdot 10^{-3}} = 174\text{m}^{-1} \quad (10)$$

Přírůstkovou metodou je určen přírůstek teploty v nechráněném průřezu $\Delta\theta_{a,t}$ [°C] z teploty plynu prostřednictvím tepelného toku $\dot{h}_{net,d}$, požár je řízen nominální normovou teplotní křivkou:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{\left[\frac{A_m}{V}\right]_b}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (11)$$

kde:

ρ_a – měrná hmotnost oceli ($= 7850\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

c_a – měrné teplo oceli v závislosti na teplotě viz [3] [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$];

$\dot{h}_{net,d}$ – hustota tepelného toku viz [3] [Wm^{-2}];

k_{sh} – součinitel vlivu zastínění.

V tomto případě je uvažován průřez exponovaný ze všech stran a u I profilu je počítáno s vlivem zastínění ($k_{sh} = 0,9$).

• Redukční součinitel meze kluzu – pružný stav:

Dosazením konkrétních hodnot do (4) je určena hodnota redukčního součinitele meze kluzu $k_{y,\theta}$ pro pružný stav:

$$k_{y,\theta} = \frac{3 F_d l \kappa_1 \kappa_2 \eta_{fi}}{16 W_{y,plast} f_y} = 0,76 \quad (12)$$

Z výpočtu změny teploty v průřezu v čase požáru pomocí přírůstkové metody podle (11) je zjištěn čas a teplota odpovídající $k_{y,\theta}$. Součiniteli meze kluzu $k_{y,\theta} = 0,76$ odpovídá teplota

v nechráněném průřezu $\theta_a = 508^\circ\text{C}$ a čas jejího dosažení je $t = 9,5$ minut. Zjednodušeně lze získat odpovídající hodnotu teploty z tab. 3.1 viz [3].

- **Redukční součinitel meze kluzu – plastický stav:**

Dosažením do (9) je dána hodnota redukčního součinitele meze kluzu $k_{y,\theta}$ pro plastický stav:

$$k_{y,\theta} = \frac{0,85 F_d l \eta_{fi}}{5,4 W_{y,plast} f_y} = 0,42 \quad (13)$$

Součiniteli meze kluzu $k_{y,\theta} = 0,42$ pro daný součinitel průřezu odpovídá teplota v nechráněném průřezu $\theta_a = 618^\circ\text{C}$ a čas jejího dosažení je $t = 13$ minut.

3.2 Průřez chráněný obkladem ze sádrovláknité desky

Obkladem chráněný nosník je také I200, z materiálu S235, $A = 3,34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, $W_y = 214 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$, $W_{y,plast} = 248 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Vlastnosti obkladového materiálu (sádrovláknité desky Rigidur) – hodnota měrného tepla $c_p = 1100 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, tepelná vodivost $\lambda_p = 0,35 \text{ WK}^{-1} \text{ m}^{-1}$, měrná hmotnost $\rho_p = 1200 \text{ kg m}^{-3}$ a tloušťka $d_p = 20 \text{ mm}$ (dvě vrstvy po 10mm). Posuzovaný průřez viz obr. 3b).

Pro obkladem chráněný průřez I200 je součinitel průřezu za požáru:

$$\frac{A_p}{V} = \frac{2(b+h)}{V} = \frac{2(0,09+0,20)}{3,34 \cdot 10^{-3}} = 174 \text{ m}^{-1} \quad (14)$$

Přírůstek teploty u chráněného průřezu dle [3]:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \frac{\phi}{3}} \Delta t - (e^{10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (15)$$

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V} \quad (16)$$

- **Redukční součinitel meze kluzu – pružný stav:**

Podle (12) vychází redukční součinitel meze kluzu $k_{y,fi} = 0,76$ a tomu odpovídá teplota v chráněném průřezu $\theta_a = 508^\circ\text{C}$ a čas jejího dosažení je $t = 38$ minut.

- **Redukční součinitel meze kluzu – plastický stav:**

Podle (13) vychází redukční součinitel meze kluzu $k_{y,\theta} = 0,42$ a tomuto součiniteli odpovídá teplota v průřezu $\theta_a = 618^\circ\text{C}$ a čas jejího dosažení je $t = 51$ minut.

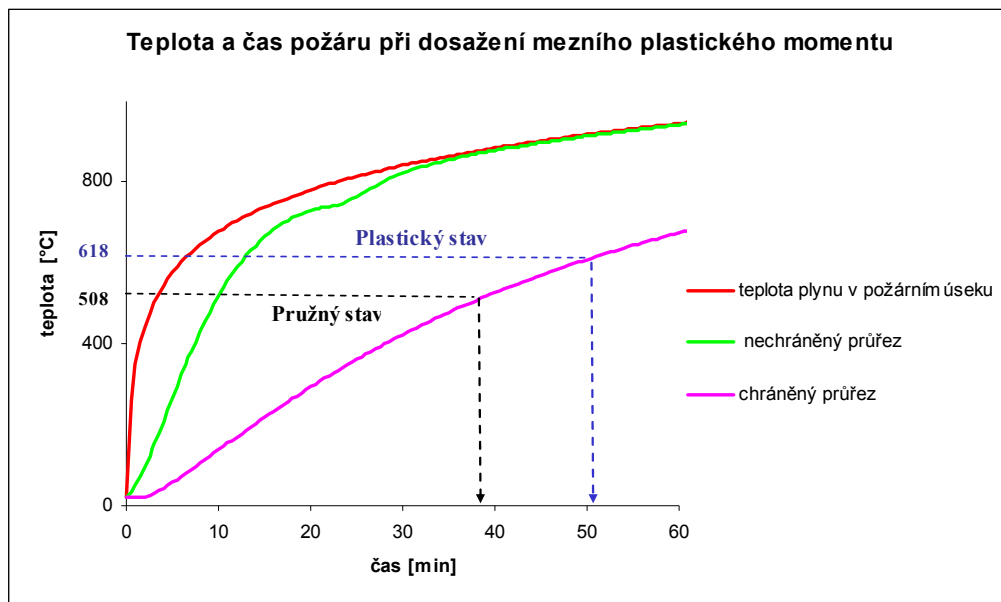
V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty času probíhajícího požáru, kdy bude dosaženo mezní momentové únosnosti v pružném stavu a také mezní plastické únosnosti a to pro průřez nosníku nechráněný i protipožárně chráněný.

Tab. 1: Čas dosažení mezní únosnosti nosníku

mezní únosnost	redukční součinitel meze kluzu	v čase požáru t [min]	
	k_y , [-]	nechráněný průřez	chráněný průřez
pružný stav	0,76	9,5	38
plastický stav	0,42	13	51

Podle tabulky 1 u nechráněného průřezu činí rozdíl v dosažení mezního momentu pro pružný a plastický stav necelé 4 minuty, u chráněného průřezu je rozdíl 13 minut.

V grafu viz obr. 4 jsou zvýrazněny hodnoty času a teploty při dosažení mezní únosnosti pro průřez chráněný i nechráněný a také pro pružný i plastický stav nosníku. Je zřejmá časová rezerva při použití plasticitního výpočtu, která u chráněných průřezů je výraznější.



Obr. 4: Teplota a čas požáru při dosažení mezní únosnosti nosníku

4 ZÁVĚR

V příspěvku je vyhodnocen čas v průběhu požáru, kdy je dosaženo mezní momentové únosnosti v pružném stavu a také mezní plastické únosnosti u staticky neurčitěho ocelového nosníku. Výsledkem jsou hodnoty časové rezervy dosažení mezní únosnosti při použití plasticitního výpočtu. U protipožárně chráněných nosníků se tyto rezervy zvyšují. Ve výpočtu je zahrnut vliv nerovnoměrného rozdělení teploty po délce nosníku.

LITERATURA

- [1] TEPLÝ, B; ŠMÍŘÁK, S. *Pružnost a plasticita II*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2000. ISBN 80-214-0498-1.
- [2] BUCHANAN, A. H. *Structural design for fire safety*. John Wiley&Sons Ltd, England, 2002
- [3] ČSN EN 1993-1-2. Navrhování ocelových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru.
- [4] ČSN EN 1991-1-2. Zatížení konstrukcí. Obecná zatížení. Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. ČSN, Praha 2004.
- [5] WALD, F. a kolektiv. *Prokazování požární odolnosti statickým výpočtem*. České vysoké učení technické v Praze, 2010, ISBN 80-01-03157-8.

Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Karel Baják, MTO - Ocelové konstrukce, s.r.o.

Ing. Petr Kučera, Ph.D., VŠB-TU Ostrava, FBI.